

Josef_ALDORF¹, Eva_HRUBEŠOVÁ², Karel_VOJTASÍK³, Lukáš_ŽURIŠ⁴

**VERIFIKACE ZDOKONALENÉ PREDIKCE ÚČINKŮ MĚLKÉHO TUNELOVÁNÍ
NA POVRCH - ČÁST 2.**

**COMPETENCE OF AN ADVANCED ESTIMATION OF SHALLOW TUNELLING IMPACTS
ON GROUND SURFACE – PART 2.**

Abstrakt

Obsahem příspěvku je ověření spolehlivosti praktického použití prezentovaných výpočetních postupů pro stanovení parametrů poklesové kotliny při ražení mělkých podzemních děl, pro kvantitativní i kvalitativní vyhodnocení těchto parametrů v konkrétních praktických úlohách a ověření dostatečné vypovídací schopnosti výsledků provedených výpočtů.

Abstract

The contribution investigates a competence of an advanced estimation providing for the variables of subsidence curve above a shallow tunneling and scrutinizes their qualitative and quantitative outputs with regard to the actual variable values drawn on field measurements.

**1 VÝPOČET POKLESOVÉ KOTLINY ZDOKONALENOU ANALYTICKO-
NUMERICKOU METODOU**

K výpočtu hodnot poklesové kotliny byla využita zdokonalená analyticko-numerická výpočetní metoda odvozená autory příspěvku [1].

Vzhledem k tomu, že metoda předpokládá nejvýše dvouvrstvé horninové prostředí, bylo nutno model z tohoto hlediska zjednodušit. Zjednodušení vychází z předpokladu, že rozhodující vliv na kvantitativní i kvalitativní charakter poklesové kotliny budou mít zeminové vrstvy v části nad stropem kolektoru – tj. navážky a štěrkopísková vrstva. Jílovité zeminy v podloží kolektoru a ve spodní části jeho příčného průřezu nejsou ve výpočtu zohledněny. Model tedy předpokládá, že celý kolektor je ražen ve vrstvě štěrkopísků s nadloží tvořeným navážkami. Jílovité zeminy v podloží kolektoru a ve spodní části jeho příčného průřezu nejsou ve výpočtu zohledněny.

Jak už bylo uvedeno dříve, výpočet byl proveden za předpokladu ekvivaletního kruhového průřezu o poloměru 2 m. Vliv skutečného obloukového tvaru příčného průřezu kolektoru je pak zohledněn zavedením odpovídajících součinitelů tvaru průřezu $\text{koef}_{\text{tvarx}} = 1.23$, $\text{koef}_{\text{tvary}} = 1.32$ [1],

¹ prof. Ing. Josef Aldorf, DrSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 944, e-mail: josef.aldorf@vsb.cz.

² doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 373, e-mail: eva.hrubesova@vsb.cz.

³ doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 947, e-mail: karel.vojtasik@vsb.cz.

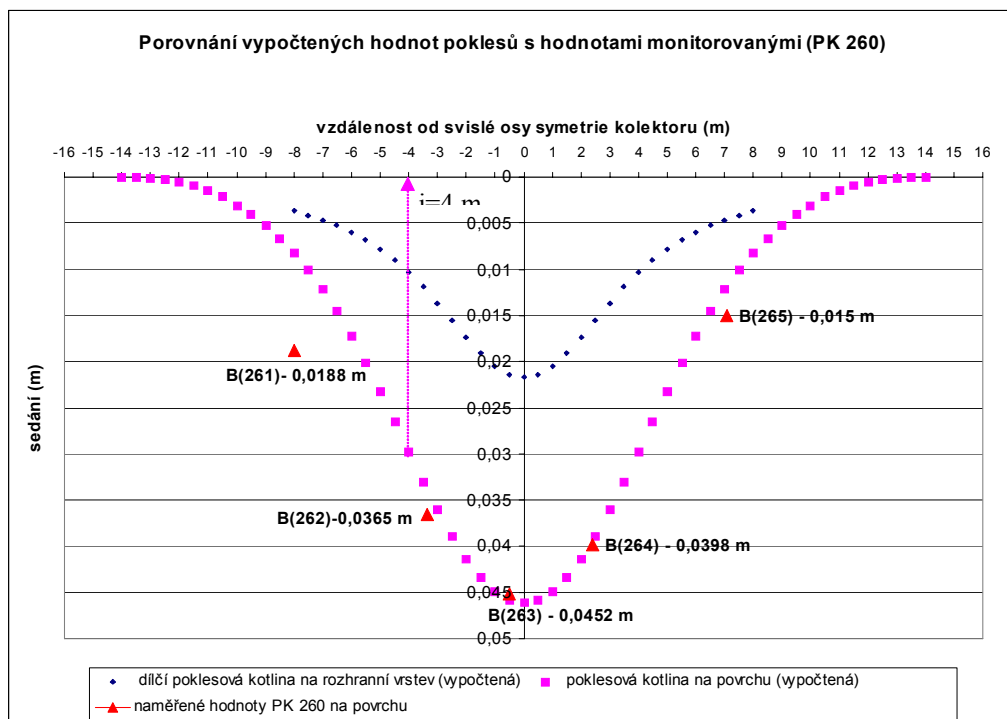
⁴ Ing. Lukáš Žuriš, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 948, e-mail: lukas.duris@vsb.cz.

kteře byly stanoveny parametrickými numerickými výpočty. Účinek reakce výztuže, která má pozitivní vliv na vznik, vývoj a charakter poklesové kotliny, byl v tomto případě eliminován zadáním nulové hodnoty reakce výztuže, což je na straně bezpečnosti. Vliv změny vodního režimu v důsledku ražení kolektoru není možno do výpočtu zahrnout.

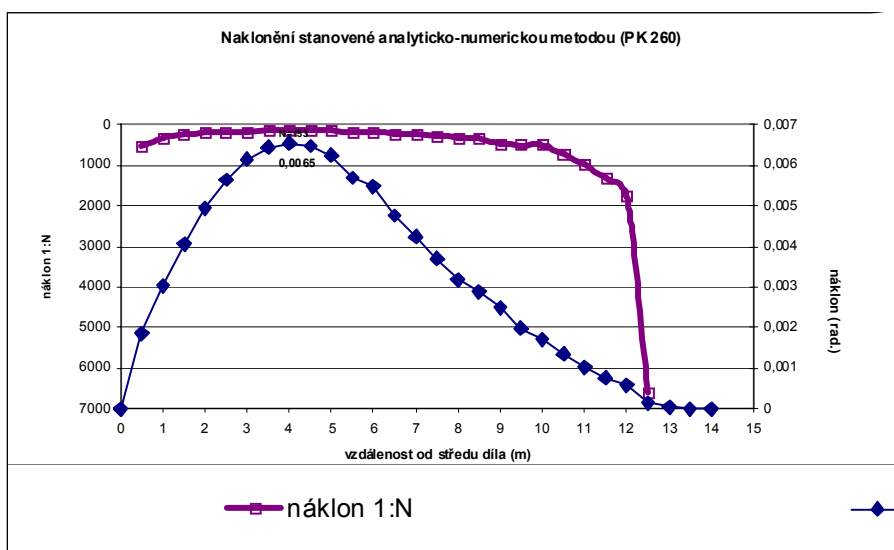
Obecný postup výpočtu představuje dva základní kroky:

- 1) Stanovení dílčí poklesové kotliny na rozhraní vrstvy štěrkopísků a navážek z analytického řešení „těžké poloroviny“, ve které je situováno dílo.
- 2) Stanovení vlivu této dílčí poklesové kotliny na poklesy na povrchu. Byla aplikována Knotheho metoda charakterizovaná hodnotou konstanty vlivu účinků tunelování a úhlem vlivu účinků tunelování. Tyto určující parametry Knotheho metody je třeba pro každou konkrétní situaci kalibrovat (konstanta vlivu účinků tunelování, úhel vlivu) [1].

Výsledky výpočtu jsou ve shodě s dříve uvedenou poznámkou o velkém rozsahu poklesové kotliny PK 260, což pravděpodobně může souviset s vlivy realizace komory v blízkosti kolektoru. Výpočet, který zohledňoval pouze vliv realizace kolektoru, dokumentuje poněkud menší šířkový dosah poklesové kotliny, výpočtem stanovený inflexní bod $i = 4$ m. Naměřené hodnoty sedání ve třech monitorovaných bodech B(262), B(263), B(264) nejbližší svislé osy symetrie kolektoru jsou v podstatě identické s hodnotami vypočtenými, větší odchylky mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami sedání se projevují ve dvou vzdálenějších bodech, a to především v bodě B(261) na levé straně monitorovaného profilu. Maximální hodnota sedání nad stropem kolektoru stanovená výpočtem je 46.1 mm, polovina šířky poklesové kotliny stanovené výpočtem je cca 12 m (odpovídající vypočtená hodnota sedání v krajních bodech 0.6 mm). Maximální naklonění v inflexním bodě je dáno poměrem 1:153. Výsledky jsou ilustrovány na obr. č. 1 a 2.



Obr. 1: Porovnání vypočtených a monitorovaných hodnot sedání (PK 260).



Obr.2: Naklonění stanovené analyticko-numerickou metodou PK 260.

Stejným postupem byly analyzovány byly i situace profilů PK060 a PK 390.

2 EMPIRICKÝ PŘÍSTUP KE STANOVENÍ PARAMETRŮ POKLESOVÉ KOTLINY

Empirické přístupy stanovení parametrů poklesové kotliny vychází z poznatků plynoucích z výsledků měření velikosti poklesů v reálných situacích. Ve většině sledovaných případů naměřené hodnoty poklesů prokazují, že charakter jejich průběhu je analogický s Gaussovou funkcí - křivkou rozložení chyb. Vyjádření poklesové křivky prostřednictvím Gaussovy funkce je základem empirických metod. Charakterizace prostředí (soudržná, nesoudržná zemina, nesoudržná zemina pod hladinou vody) a základní objektivní okolnosti definující dílo (poloměr díla, hloubka uložení díla pod povrchem terénu, „*ground loss – nadvýlom*“) [5], které determinují poklesovou kotlinu, jsou implementovány do parametrů, které určují průběh Gaussovy křivky.

K vyjádření průběhu poklesové kotliny jsou rozhodující dva její parametry. Prvým je hodnota horizontální vzdálenosti inflexního bodu na poklesové křivce od středu díla (i). Druhým je hodnota maximálního poklesu na povrchu terénu nad středem díla (u_{\max}).

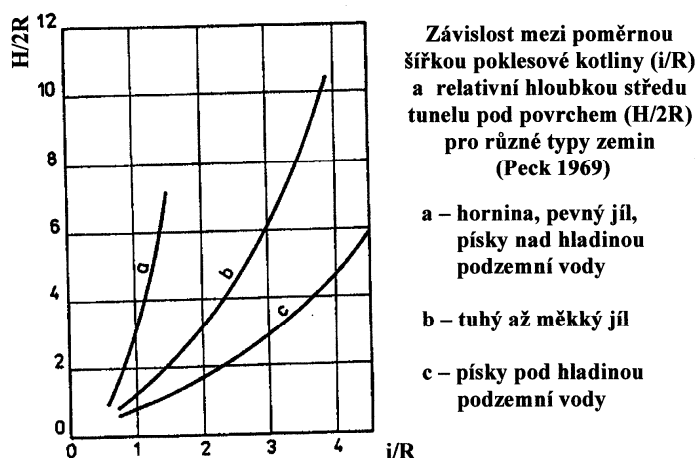
Hodnota vzdálenosti inflexního bodu (i) vymezuje šířku - dosah poklesové kotliny. Závisí na typu prostředí a mají na ni také vliv hloubka umístění středu díla pod povrchem terénu (H) a poloměr díla (R).

Hodnota maximálního poklesu na povrchu terénu nad středem díla (u_{\max}) závisí na velikosti nadvýlomu – ground loss (V_0). Jeho hodnota je dána technologickými okolnostmi tj. použitou metodou realizace díla a dále subjektivními okolnostmi. Technologické okolnosti jsou např. rozdíl mezi hrubým – raženým profilem díla a rozměry konstrukce výztuže. Tyto okolnosti jsou neměnné. Naopak, subjektivní okolnosti zachycují proces realizace díla. Hodnoty nadvýlomu z titulu subjektivních okolností jsou značně proměnlivé a předem obtížně odhadnutelné.

Hodnota maximálního poklesu na povrchu terénu nad středem díla (u_{\max}) je určována z podmínky rovnosti ploch nadvýlomu (V_0) a poklesové kotliny (hodnoty integrálu Gaussovy křivky). Přibližný vztah pro výpočet maximálního poklesu (u_{\max}) je [5]:

$$u_{\max} = V_0 / (2,5 \cdot i) \quad (1)$$

Rozhodujícím parametrem, který určuje průběh poklesové kotliny, je hodnota vzdálenosti inflexního bodu. V případě empirických metod, je její velikost odvozována z výsledků získaných na skutečných dílech (viz. obr. 3).



Obr.3

Naměřené hodnoty vzdálenosti inflexního bodu (grafy na obr. 3) jsou základem k odvození analytických vztahů, podle kterých stanovujeme tuto vzdálenost.

Jednou z funkcí, která umožňuje vyjádřit charakter závislostí prezentovaných na obr. 3 je polynommická funkce, tvaru:

$$i/R = (H/2R)^n \quad (2)$$

Exponent (n) nabývá různých hodnot: $n=1,0$ (Attewell, 1977); $n=0,8$ viz. [4]. Vzdálenost inflexního bodu je zde funkcí poloměru díla a hloubky středu díla pod povrchem terénu. Hodnota exponentu (n) je konstantní pro všechny typy prostředí. Konstantní hodnota exponentu reprezentuje jedinou křivku, nivelizuje význam role charakteru prostředí na vývoj poklesové kotliny.

Objektivnější zahrnutí vlivu charakteru prostředí je podmíněno volbou funkce. Tato funkce musí umožnit vyjádřit soustavu křivek, které reprezentují příslušný typ prostředí. Pro tento účel je vhodná exponenciální funkce, která má tvar:

$$i = k_1 \cdot R \cdot \exp^{[k_2 \cdot \ln(H/2R)]} \quad (3)$$

Kde (k_1) a (k_2) jsou koeficienty, které jsou individuálně stanoveny pro určitý typ zeminy (dle křivek a, b, c na obr. 2).

Tab.1: Hodnoty koeficientů k_1 a k_2 odvozené dle závislostí viz.obr. 2 (Peck, 1969).

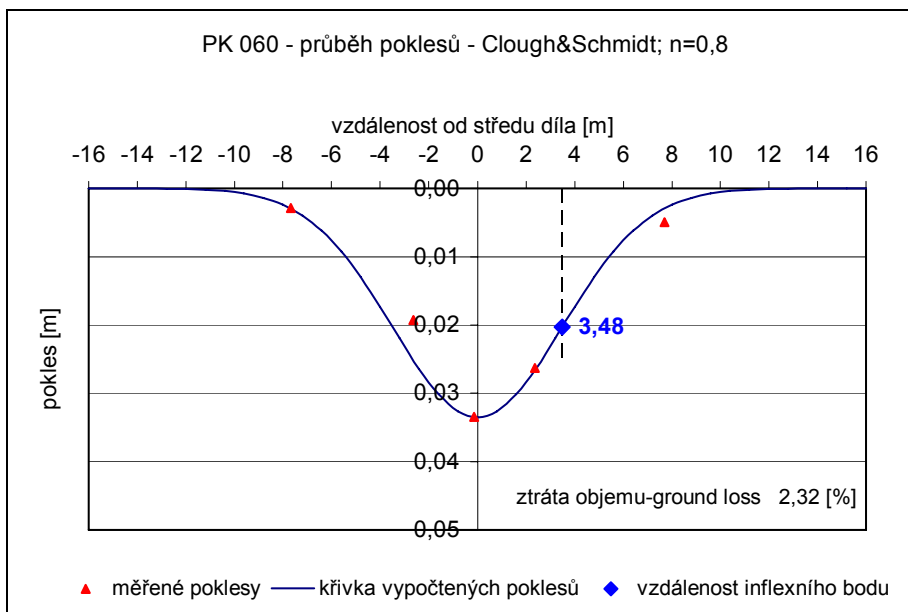
typ prostředí	k_1	k_2
pevný jíl, písek nad hladinou podzemních vod	0,5912	0,4646
měkký jíl	0,9009	0,6491
písek pod hladinou podzemních vod	1,2899	0,7207

Velikost nadvýlomu je parametr, který by bylo možno stanovit například na základě sledování hmotnosti vytěžené zeminy na jeden metr zabírky nebo vyhodnocením konvergencí. V praxi se to však neprovádí. Tento parametr je zpravidla pouze odhadován. Podle způsobu realizace díla a charakteru prostředí se jeho velikost pohybuje v intervalu od 2 do 6 procent z projektované plochy hrubého průřezu díla, přičemž nižší hodnota charakterizuje kvalitnější technologii ražení.

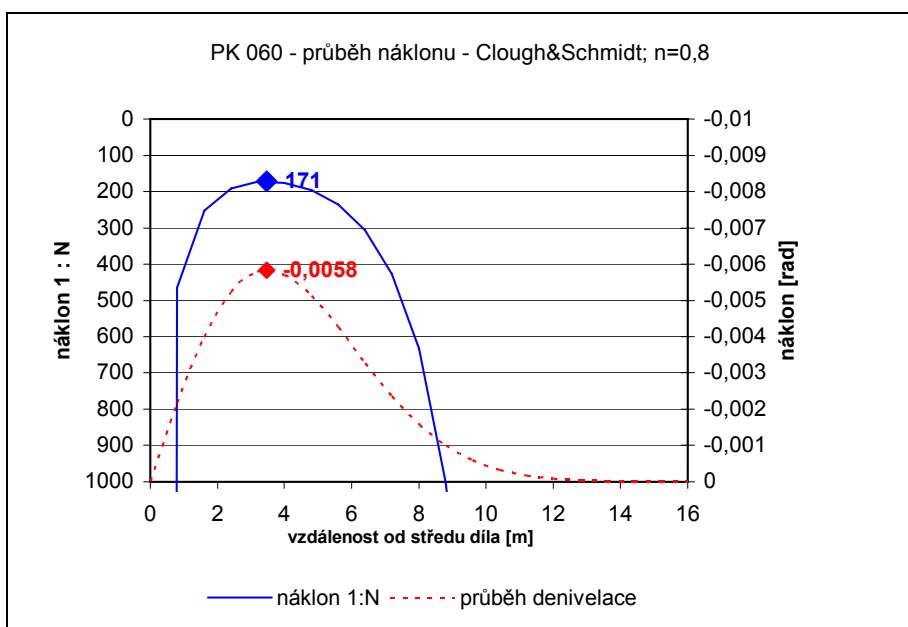
Hodnota velikosti nadvýlomu (V_0) je parametr, který je vesměs odhadován. Variací tohoto parametru můžeme přizpůsobovat poklesovou funkci, tj. upřesňovat hodnoty exponentu n nebo koeficientů k_1 a k_2 , skutečné situaci za předpokladu, že známe hodnoty skutečných poklesů. Jsou k tomu zapotřebí hodnoty poklesů v minimálně třech bodech, které leží na jednom rameni - svahu

poklesové kotliny. Body by měly být lokalizovány tak, aby první bod byl nad dílem, nejlépe na jeho vertikální ose. Hodnota poklesu v tomto bodu je důležitá pro upřesnění hodnoty nadvýlomu (V_0). Zbývající dva body by měly ležet jeden před a druhý za přepokládaným inflexním bodem. Hodnoty poklesu ve druhém a třetím bodě jsou důležité pro doladění průběhu poklesové křivky, tj. k stanovení koeficientů (n), nebo (k_1) a (k_2).

Následující obrázky (obr. 4 a 5) uvádí výsledky stanovení funkce průběhu poklesové kotliny nad kolektorem pro profil PK 060, na kterém byly měřeny hodnoty poklesů. Náhradní poloměr kolektoru, činí 2 m, jeho střed leží 8 m pod povrchem terénu. Analogické výstupy byly zpracovány i pro situace PK 260 a PK 390.



Obr.4



Obr.5

3 SHRUTÍ POZNATKŮ EMPIRICKÉHO PŘÍSTUPU PROGNOZY POKLESOVÉ KOTLINY NAD PODZEMNÍM DÍLEM LEŽÍCÍM V MALÉ HLOUBCE POD POVRCHEM TERÉNU

Z provedených výpočtů průběhů poklesů na základě Gaussovy křivky a jejich srovnání s naměřenými poklesy ve skutečných situacích lze konstatovat, že tato funkce je vhodná k analytickému vyjádření poklesové křivky. Jejimi parametry lze do výpočtu průběhu poklesové kotliny zahrnout základní okolnosti, které do výpočtu zavádí charakter prostředí, parametry realizovaného díla, metodu a proces realizace díla.

Rozhodujícím parametrem, který má zásadní vliv na průběh poklesové kotliny je hodnota horizontální vzdálenosti inflexního bodu od středu díla. Její odhad pro prvotní prognózu vývoje poklesové křivky je možno provádět na základě všeobecně uznávaných hypotéz a z nich odvozených metod [3], [4], [5]. Z grafického vyjádření průběhu vypočtené poklesové křivky a v témže grafu vynesných naměřených hodnot poklesů plyne, že zde existuje soulad mezi vypočtenými a měřenými hodnotami poklesů.

K výpočtu hodnoty vzdálenosti inflexního bodu je možno použít dvou různých závislostí. Závislost (2) pracuje s jedním parametrem a závislost (3) se dvěma parametry, s pomocí kterých je do výpočtu inflexního bodu implementován typ prostředí. Který z použitých vztahů je vhodnější, zda vztah (2) modifikující exponent n , nebo vztah (3) modifikující dva koeficienty k_1 a k_2 , k výpočtu vzdálenosti inflexního bodu, z provedené analýzy nelze určit.

Uvedeným postupem je možno provádět prognózu průběhu poklesové křivky. Zpřesnění prognózy je podmíněno odvozením příslušných parametrů, vztah (2) exponent n , nebo vztah pro koeficienty k_1 a k_2 , které vystupují v závislostech určujících velikost vzdálenosti inflexního bodu, a to z výsledků měření poklesů na reprezentativních situacích. Hodnoty odvozených koeficientů mohou být použity k stanovení velikosti vzdálenosti inflexního bodu i dalších situacích v typu prostředí, pro které byly odvozeny.

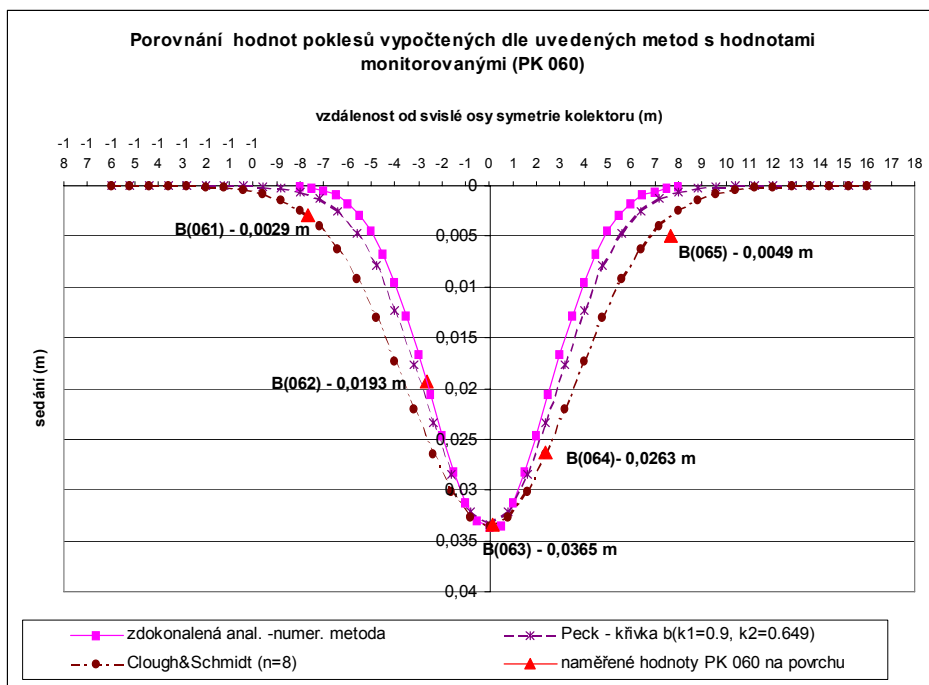
4 ZÁVĚREČNÁ SROVNÁNÍ POKLESOVÝCH KOTLIN STANOVENÝCH DLE JEDNOTLIVÝCH VÝPOČETNÍCH METOD S HODNOTAMI ZÍSKANÝMI GEOTECHNICKÝM MONITORINGEM

Graf na obr. č. 6 ilustruje srovnání výsledků vypočtených hodnot sedání stanovených jak empirickými metodami, tak i zdokonalenou analyticko-numerickou metodu na příkladu profilu PK 060.

Z provedeného srovnání plyne, že výsledky výpočtů jak empirickými metodami, tak i zdokonalenou analyticko-numerickou metodou vykazují dobrou shodu mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami sedání v monitorovaných bodech B(062), B(063) a B(064) v blízkosti svislé osy symetrie kolektoru. V bodech B(061) a B(065) situovaných na okrajích poklesové kotliny jsou již odchylky u většiny metod relativně výraznější (max. však cca 5 mm v pravé části kotliny). Pouze metoda Clough&Schmidt ($n = 0,8$) vykazuje dobrou shodu i v těchto krajních bodech poklesové kotliny.

Výpočtem stanovená maximální hodnota sedání je v případě aplikace všech tří metod 33 mm, stanovená vzdálenost inflexního bodu od svislé osy symetrie se poněkud liší, hodnoty jsou uvedeny ve srovnávací tabulce č. 2.

V posledním řádku tabulky jsou pak uvedeny charakteristiky poklesové kotliny vyplývající z pouhého proložení Gaussovy křivky naměřenými hodnotami.



Obr.6: Porovnání vypočtených hodnot poklesů dle uvedených výpočetních metod s hodnotami naměřenými (PK 060).

Tab.2: Tabulka vypočtených hodnot charakteristik poklesové kotliny PK 060.

metoda	ztráta objemu [%]	vypočtený max.pokles [m]	inflexe [m]	max. naklonění v inf. bodě	max. poměrné vodorovné přetvoření*)
Peck křivka b (K1=0,9; K2=0,649)	1.88	0.0334	2.83	1:139	0.004
Clough&Schmidt (n=8)	2.32	0.0335	3.48	1:171	0.0035
zdokon. anal.-num. metoda	-	0.0337	2.5	1:124	0.005
regrese z naměřených hodnot (Gaussova křivka)	-	0.0319	3.33	1:179	0.003
*) maximální poměrné vodorovné přetvoření je aproximováno vztahem $\varepsilon_{\max} = 0.6$ násobek naklonění v inflex. bodě (Bradáč)					

5 ZÁVĚREČNÁ DOPORUČENÍ

Z výsledků komparace plyne, že použité výpočetní metody jsou prakticky aplikovatelné a mají dostatečnou vypovídací schopnost. Využití empirických výpočetních metod však vyžaduje důslednou kalibraci výpočetního modelu vzhledem k empirickým koeficientům vstupujícím do výpočtu. Kalibraci vyžaduje rovněž zdokonalená analyticko- numerická metoda v případě, že je aplikována na dvouvrstvé horninové prostředí. V tomto případě je nutno vhodně zvolit v závislosti na konkrétních podmínkách dva zmiňované parametry Knothovy metody – konstantu vlivu účinků tunelování a úhel vlivu účinků tunelování.

Z porovnání výsledků rovněž plyne ta skutečnost, že ve většině případů bylo dosaženo nejlepší shody mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami sedání v bodech lokalizovaných v blízkosti svislé osy kolektoru. Obecně lze konstatovat, že vypočtené poklesové kotliny nedosahují takové šířky, jaká byla signalizována monitorovanými hodnotami sedání v krajních bodech poklesové kotliny. Tento nesoulad může být pravděpodobně z velké části zapříčiněn některými dalšími faktory, které danou poklesovou kotlinu ovlivňují a které nemohly být do aplikovaných výpočetních modelů implementovány (vliv ražení sousedících podzemních děl, vliv změny vodního režimu v důsledku ražení, vliv nadvýmů apod.). Výhodou těchto aplikovaných metod je však operativnost, nepřilíhající velké požadavky na vstupní data výpočtu, snadná a rychlá příprava modelu a minimální nároky na výpočetní čas (výpočet trvá řádově několik sekund). Vliv některých dalších výše zmíněných faktorů ovlivňujících vznik, vývoj a charakter poklesové kotliny by pak vyžadoval využití numerických metod modelování (např. metodu konečných prvků), což však je však z hlediska vstupních dat, tvorby modelu i samotného výpočtu záležitost časově náročnější.

Doporučení

Provedené analýzy a komparace naměřených parametrů poklesových kotlin s hodnotami stanovenými z výpočtových postupů ukázaly, že:

- pro stanovení parametrů poklesových kotlin ve fázi předběžné prognózy (DUR-Dokumentace pro územní rozhodnutí, DSP- Dokumentace pro stavební povolení) se jako nejvhodnější postup jeví metody „loss of ground“ s použitím doporučených hodnot empirických koeficientů ($\Delta V \approx$ cca 2-3%; k_1, k_2). Po provedení ověřovacích měření parametrů poklesové kotliny lze pro dané konkrétní geotechnické podmínky hodnoty empirických koeficientů upřesnit do té míry, že spolehlivost prognózy bude vyhovující i pro stupeň RDS(Realizační dokumentace stavby) a konečné rozhodnutí o realizaci ochrany objektů.
- zdokonalenou analyticko-numerickou metodu a metody MKP používat v případě složitých geotechnických podmínek rovněž po prvotním ověření měření. Vypovídací schopnost těchto metod zajišťuje vysokou spolehlivost prognózy s odchylkami do max. cca 3-5 % skutečných účinků vlivu tunelování. Její spolehlivější využití může být doplněno modelem MKP, který zohlední další geotechnické a geologické faktory.

LITERATURA

- [1] HRUBEŠOVÁ, E.; ALDORF, J.; VOJTASÍK, K. Návrh metod a postupů pro stanovení hodnoty možných vlivů poklesů a deformací na povrchové stavby a inž. sítě. *Dílčí zpráva č. 2 projektu ČBÚ 38-05 : 2006*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2006
- [2] ALDORF, J.; BRADÁČ, J.; VOJTASÍK, K. a kol. *Podzemní stavby a zakládání staveb - vybrané kapitoly*. Ostrava : ES VŠB, 1992, s. 68-88 . ISBN 80-7078-163-7.
- [3] ČSN 73 0039 *Navrhování objektů na poddolovaném území*
- [4] ATTEWELL, P. B. Ground movements caused by tunnelling in soil . In *Proc. Int. Conf. „Large Ground Movements and Structures“ : 1977*, Cardiff, U.K. : Pentech Press, London, 1977, s. 812-948.
- [5] CLOUGH, G. W.; SCHMIDT, B. Design and performance of excavations and tunnels in soft clay. *Soft clay Engineering*. Eds. E.W. Brand & R.P. Brenner, Elsevier, N.Y., 1981, s. 569-634.
- [6] PECK, R .B. Deep excavations and tunnelling in soft ground. In *Proc. Int. Conf. „VIIth Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng“ : 1969*, Mexico, State-of-the-Ar Volume. 1969, s. 225-290.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl zpracován s podporou Grantové agentury ČR při řešení projektu GAČR č. 103/09/2016.

Oponentní posudek vypracoval:

doc. Ing. Petr Konečný, CSc., Ústav geoniky AV ČR